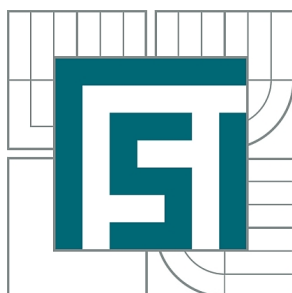




**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A**  
**BIOMECHANIKY**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND  
BIOMECHANICS

# **NÁVRH KONCEPCE ZAŘÍZENÍ ŠPLHAJÍCÍHO PO SLOUPECH**

DESIGN OF POST CLIMBING MACHINE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**TOMÁŠ OBŠIL**

**VEDOUcí PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. JIŘÍ KREJSA, Ph.D.**

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2014/2015

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Tomáš Obšil

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Návrh koncepce zařízení šplhajícího po sloupech**

v anglickém jazyce:

#### **Design of post climbing machine**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je vytvořit koncepční návrh zařízení, které bude schopné šplhat po sloupech veřejného osvětlení, semaforech a podobných prvcích. Napájení zařízení řešte externím kabelem. Zařízení by mělo být schopné unést užitečné zatížení v řádu kilogramů.

Cíle bakalářské práce:

1. Proved'te rešeršní studii způsobů lokomoce na sloupech
2. Vyberte (a tento výběr odůvodněte) jeden způsob lokomoce
3. Zpracujte koncepční návrh celého zařízení

Seznam odborné literatury:

L. Ma, B. Tan, J. Shen: The Study of Pole-climbing Robot, ICECE 2010, 2010

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jiří Krejsa, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 10.11.2014

L.S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
Děkan fakulty

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá zařízeními šplhajícími po sloupech. Teoretická část práce se věnuje základnímu rozdělení robotů a popisem různých typů zařízení šplhajících po sloupech.

Praktická část práce se zabývá koncepčním návrhem zařízení šplhajícího po sloupech. Zařízení je dimenzováno tak, aby zvládlo unést užitečné zatížení v řádu kilogramů. Napájení šplhajícího zařízení je řešeno externím zdrojem. Koncepční návrh je zpracován v programu SolidWorks.

## **Klíčová slova**

Robot, šplhající zařízení, koncepční návrh, lokomoce po sloupech

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with post climbing machines. The theoretical part of the thesis deals with the basic division of robots and a description of different types of post climbing machines.

The practical part of the thesis deals with the conceptual design of the post climbing machine. The machine is designed to carry on external payload in kilograms. The power supply of the post climbing machine will be realized by external power supply. Conceptual design is developed in SolidWorks.

## **Keywords**

Robot, climbing machine, Conceptual design, post locomotion

### **Bibliografická citace:**

OBŠIL, T. *Návrh koncepce zařízení šplhajícího po sloupech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 31 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Krejsa, Ph.D..

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh koncepce zařízení šplhajícího po sloupech jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **29. května 2015**

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Doc. Ing. Jiří Krejsa, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **29. května 2015**

.....  
podpis autora

# Obsah

1	Úvod .....	10
2	Rozdělení mobilních robotů podle skupiny lokomočního ústrojí .....	11
3	Typy zařízení šplhající po sloupech .....	12
3.1	3D CLIMBER .....	12
3.2	RiSE V3 .....	13
3.3	UT-PCR .....	14
3.4	Výběr vhodného typu lokomoce pro navrhované zařízení.....	15
4	Koncepční návrh konstrukce zařízení šplhajícího po sloupech.....	17
4.1	Volba členů lineárního pohonu .....	18
4.1.1	Pohybový šroub.....	19
4.1.2	Hlavní motor .....	21
4.1.3	Teleskopická tyč.....	24
4.2	Kloub naklápění .....	26
4.3	Uchopovací mechanismus.....	28
4.4	Ostatní prvky.....	29
4.5	Souhrn .....	29
	Závěr .....	30
	Literatura.....	31



## Seznam obrázků

Obrázek 1: Zařízení 3D CLIMBER překonávající zalomení na sloupu .....	13
Obrázek 2: Robot 3D CLIMBER v počítačové simulaci lokomoce po sloupu se zahnutím .....	13
Obrázek 3: Zařízení RiSE V3 šplhající po dřevěném telegrafním sloupu .....	14
Obrázek 4: Šplhající robot UT-PCR při lokomoci po sloupu .....	15
Obrázek 5: Přibližný vzhled navrhovaného zařízení šplhajícího po sloupech; popis obrázku (1 – lineární pohon, 2 – hlavní motor, 3 – vrchní teleskopická tyč, 4 – spodní teleskopická tyč, 5 – naklápěcí motor, 6 – motor uchopovacího mechanismu) .....	18
Obrázek 6: Schématické znázornění silových poměrů trapézového závitu .....	21
Obrázek 7: Přibližné průběhy VVÚ v teleskopické tyči .....	24
Obrázek 8: Teleskopická tyč ve vysunutém stavu .....	26
Obrázek 9: Možné řešení kloubu naklápění.....	27
Obrázek 10: Uchopovací mechanismus se zavřenými čelistmi .....	28
Obrázek 11: Uchopovací mechanismus s otevřenými čelistmi.....	28

# 1 ÚVOD

V současné době se stále více rozvíjejí robotické systémy. Stále více nahrazují lidskou činnost ve všech možných odvětvích. Robotické systémy lze nalézt v průmyslu, městském prostředí, zdravotnictví, zemědělství, lesnictví, stavebnictví a mnoha dalších oblastech.

Jednou z možných oblastí využití jsou roboti šplhající po svislých konstrukcích. Teoretická část práce se zabývá základním rozdělením robotů a popisem různých typů zařízení šplhajících po sloupech. Prvním robotem je 3D CLIMBER. Jedná se o zařízení, které se vyznačuje metodou lokomoce krok po kroku. Touto metodou je schopný překonávat různé překážky na sloupech. Dalším robotem je RiSE V3. Ten je charakterizován především schopností velmi rychlé lokomoce po dřevěných sloupech. Nedokáže však šplhat po kovových sloupech. Třetím typem je UT-PCR, který používá kolový lokomoční systém.

Praktická část práce se zabývá samotnou koncepcí zařízení šplhajícího po sloupech. Zařízení bude dimenzováno tak, aby zvládlo unést užitečné zatížení v řádu kilogramů. Napájení zařízení bude řešeno externím zdrojem. Koncepční návrh bude zpracován v programu SolidWorks.

Zařízení šplhající po sloupech jsem si vybral, protože se jedná o robota, který značně usnadní lidskou činnost. Dokáže totiž místo člověka pohodlně vylézt na vysoké sloupy například s kamerou nebo fotoaparátem a seshora monitorovat dopravní situaci případně se můžete jen nechat vyfotit. Zajímavé by však byly i aplikace robota pro výměnu prasklých žárovek pouličních lamp, servis nefunkčních semaforů a mnoho dalších servisních úloh. Tento robot najde uplatnění jak pro servisní úkony, tak pro zábavu.

## 2 ROZDĚLENÍ MOBILNÍCH ROBOTŮ PODLE SKUPINY LOKOMOČNÍHO ÚSTROJÍ

Definice mobilního robotického servisního systému říká, že „Mobilní servisní robot (MSR) lze chápat jako počítačem řízený integrovaný technický (mechanický, mechatronický) systém, schopný samostatného pohybu v prostoru pomocí vlastního lokomočního ústrojí a autonomní, cílově orientované interakce s reálným okolním prostředím pomocí prostředků umělé inteligence v souladu s instrukcemi operátora (člověka), případně podle instrukcí modelu chování, nebo podle instrukcí řízení události.“ [1]

Robotické systémy lze rozdělit podle skupiny lokomočního ústrojí do pěti následujících skupin. [1]

- Kolové systémy
- Pásové systémy
- Hybridní
- Biomechanické systémy
  - Kráčející
  - Skákající
  - Plazivé
  - Šplhající
- Ostatní systémy
  - Plavající
  - Létající

Všechny mobilní robotické systémy jsou svým lokomočním ústrojím určeny pro pohyb v určitém operačním prostoru. V něm se mohou pohybovat v závislosti na použité geometrii podle daných kinematických zákonitostí použité konstrukce. Okolní komunikaci zařízení s prostředím zajišťují senzory, které získávají pro systém důležité informace.

Kolové a pásové systémy se dokáží pohybovat po vodorovných a šikmých plochách. Hybridní systémy kombinují vlastnosti více typů dohromady, lze je tak využít ve více prostředích. Biomechanické systémy se svou konstrukcí inspiroují v přírodě, kde existuje mnoho živočichů s velmi zajímavými způsoby lokomoce. Je snaha o napodobení těchto způsobů při konstrukci lokomočních systémů, což může být velmi obtížné.

### 3 TYPY ZAŘÍZENÍ ŠPLHAJÍCÍ PO SLOUPECH

Definice mobilního robotického servisního systému říká, že „Mobilní servisní robot (MSR) lze chápat jako počítačem řízený integrovaný technický (mechanický, mechatronický) systém, schopný samostatného pohybu v prostoru pomocí vlastního lokomočního ústrojí a autonomní, cílově orientované interakce s reálným okolním prostředím pomocí prostředků umělé inteligence v souladu s instrukcemi operátora (člověka), případně podle instrukcí modelu chování, nebo podle instrukcí řízení události.“ [1]

Šplhající systémy jsou v posledních několika letech ve velkém rozmachu. Vliv na to má především velmi široká oblast jejich uplatnění. Lze je využít například pro nedestruktivní kontroly těžko přístupných svařovaných konstrukcí, při opravách potrubí s nebezpečnými médii nebo k výměnám žárovek pouličních sloupů vysoko nad zemí. Všechny tyto práce jsou řazeny mezi obtížné a rizikové pro lidi. Vysoká nákladnost těchto prací je dalším důvodem rozvoje šplhajících systémů. [2]

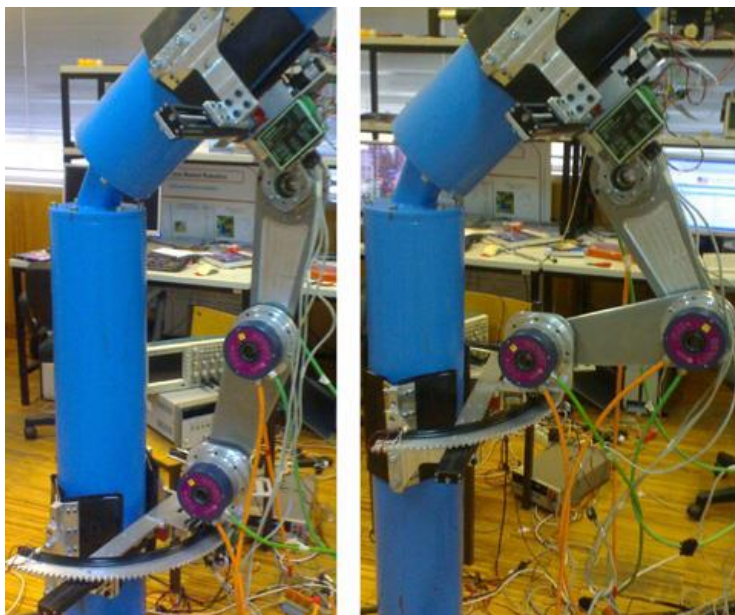
Způsoby lokomoce na sloupech budou popsány na jednotlivých typech zařízení v následujících podkapitolách.

#### 3.1 3D CLIMBER

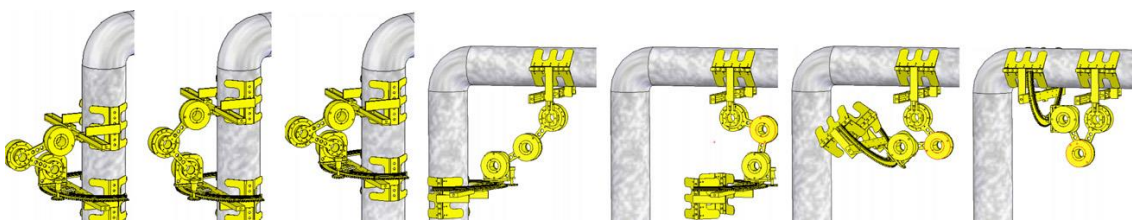
3D CLIMBER je zařízení určené pro lokomoci na průmyslových potrubích kruhového průřezu. Vysoká členitost průmyslových potrubí s mnoha spoji, zahnutím, spojovacími přírubami, ventily a dalšími prvky je hlavním důvodem použití typu lokomoce krok za krokem. Pro překonání takových překážek je nutné, aby se systém částečně odpoutal od sloupu, což umožňuje právě způsob lokomoce krok za krokem. Zařízení má tři klouby s vodorovnými navzájem rovnoběžnými osami a jeden mechanismus natáčení, díky kterému je schopný se otáčet kolem osy sloupu v rozsahu  $180^\circ$ . Obrázek 1 zobrazuje zařízení 3D CLIMBER při překonávání úhlu  $45^\circ$  na zkušebním sloupu a Obrázek 2 ukazuje počítačovou simulaci lokomoce po sloupu se zahnutím  $90^\circ$ . [2]

Hlavní charakteristiky zařízení 3D CLIMBER:

Počet stupňů volnosti	4
Hmotnost	42 kg
Rozměry	0,5 x 0,6 x 0,85 m
Rychlost stoupání	1 m/min
Rozsah průměru sloupu	200 – 350 mm



**Obrázek 1: Zařízení 3D CLIMBER překonávající zalomení na sloupu**



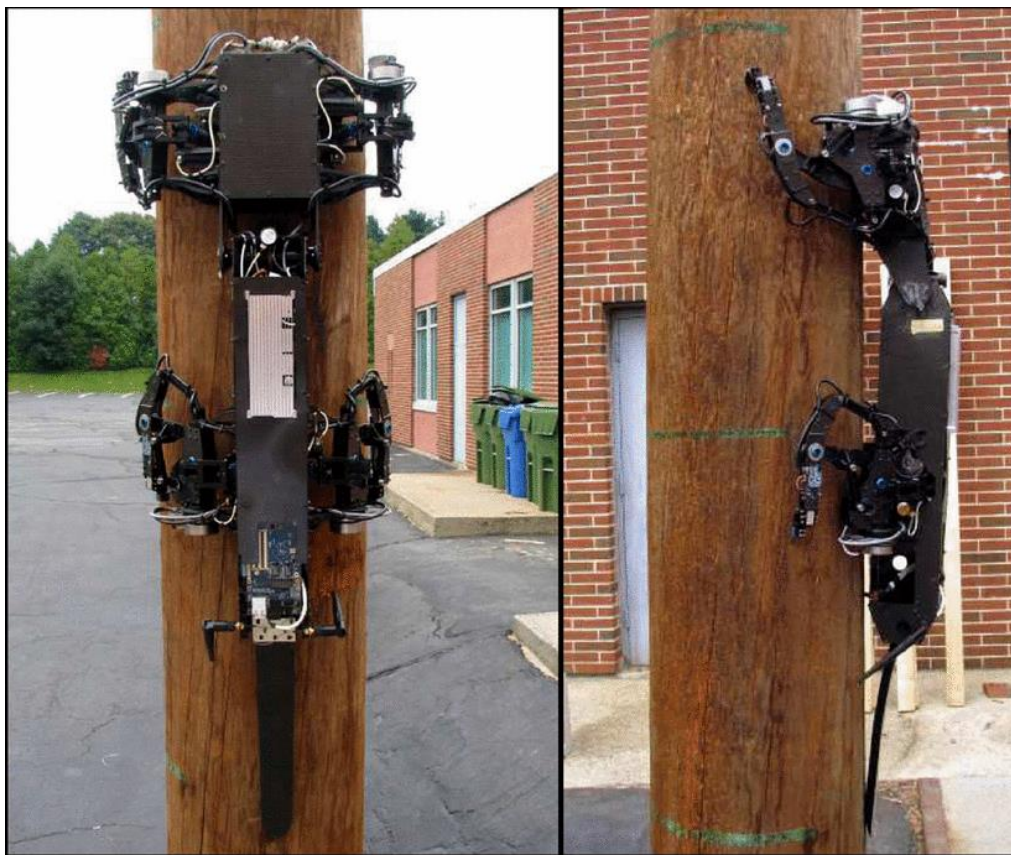
**Obrázek 2: Robot 3D CLIMBER v počítačové simulaci lokomoce po sloupu se zahnutím**

### 3.2 RiSE V3

Zařízení RiSE V3 je specializováno hlavně pro vysokorychlostní lokomoci po dřevěných sloupech s kruhovitým průřezem, zvládá však i pohyb ve složitém terénu. Ke šplhání používá kráčejší lokomoční systém modifikovaný pro pohyb po sloupech. Díky ostrým drápům na všech čtyřech končetinách se dokáže přichytit na sloup. Při zastavení spotřebovává minimum energie což je dáno jeho konstrukcí, obzvláště díky drápům zaseklým ve sloupu. RiSE V3 robot je velmi rychlý, avšak zvládá jen lezení po přímých sloupech a nedokáže lézt po sloupech kovových. Obrázek 3 zobrazuje systém RiSE V3 při lezení po dřevěném telegrafním sloupu. [3]

Hlavní charakteristiky zařízení RiSE V3:

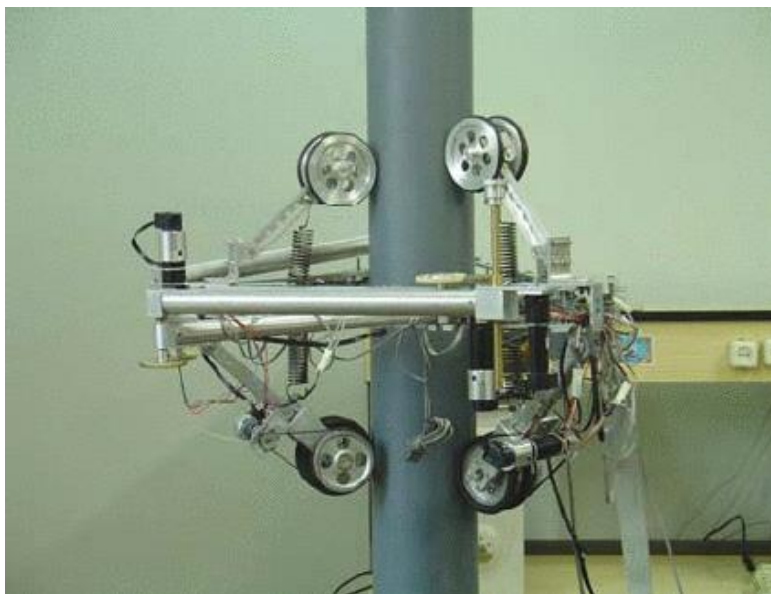
Rychlost stoupání	<i>21 cm/s (12,6 m/min)</i>
Hmotnost	<i>5,4 kg</i>
délka	<i>70 cm</i>



Obrázek 3: Zařízení RiSE V3 šplhající po dřevěném telegrafním sloupu

### 3.3 UT-PCR

University of Tehran-Pole Climbing Robot (UT-PCR) je šplhající robot, který k lokomoci po sloupech využívá kolový systém. Jednotlivé dvojice kol jsou spojeny pružinami, což zajišťuje dostatečnou třecí sílu, aby nedocházelo k prokluzu hnacího kola. Díky použité geometrii je systém schopný překonat změny průřezu a pozvolné ohyby sloupu. Rozměry tohoto zařízení jsou  $550 \times 350 \times 80 \text{ mm}$ . Výhodou tohoto systému je rychlost lokomoce po sloupech, avšak nedokáže překonat větší překážky na sloupu. Zařízení UT-PCR nemá definovanou rychlost lokomoce, lze však předpokládat, že se dokáže pohybovat velmi rychle, díky svému kolovému lokomočímu zařízení, které zajišťuje plynulý pohyb. Obrázek 4 zachycuje šplhající systém UT-PCR při šplhání na sloup. [4]



**Obrázek 4:** Šplhající robot UT-PCR při lokomoci po sloupu

### 3.4 Výběr vhodného typu lokomoce pro navrhované zařízení

Výběr vhodného typu lokomoce je prvním základním krokem k úspěšné realizaci výsledného zařízení. Vychází především ze zadání úkolu, kde jsou stručně charakterizovány nejdůležitější parametry a podmínky, které musí navrhované zařízení splňovat. Pro co nejlepší výsledek je potřeba zvážit co nejvíce způsobů lokomoce a prozkoumat celou problematiku z více možných hledisek.

Vyjdeme tedy ze zadání, kde cílem práce je vytvořit koncepční návrh zařízení, které bude schopné šplhat po sloupech veřejného osvětlení, semaforech a podobných prvcích a mělo by být schopné unést užitečné zatížení v řádu kilogramů.

Pro přehlednější výběr je vytvořen celkový přehled šplhajících zařízení a jejich charakteristických parametrů, ze kterých určíme výhody daných zařízení a typů lokomoce. viz Tabulka 1.

**Tabulka 1:** Přehled základních parametrů jednotlivých typů zařízení

Typ zařízení	Rychlost lokomoce (m/min)	Hmotnost (kg)	Oblast použití
3D CLIMBER	1	42	sloupy rozsah 200 - 350 mm
RiSE V3	12,6	5,4	pouze dřevěné sloupy
UT-PCR	-	-	sloupy

Navrhované zařízení budu volit s ohledem na zadání práce. Drtivá většina sloupů veřejného osvětlení, semaforů a dalších svislých prvků, po kterých se má navrhované zařízení pohybovat, je buď se záhybem, nebo s různými návěsnými

cedulemi. Zařízení UT-PCR dokáže vyvinout velkou rychlost díky svému kolovému systému, avšak kvůli návěsným cedulím na sloupech může být jeho operační prostor značně omezen. Stejně tak robot RiSE V3 má vysokou rychlost lokomoce, avšak je určen pouze pro dřevěné sloupy, což znamená, že se nemůže pohybovat po kovových sloupech. Jeho lokomoční mechanismus by však mohl být přizpůsoben pohybu po kovových sloupech upravením jeho noh například přidáním magnetických chodidel nebo přísavek. Takový systém by však byl složitý a drahý, navíc by jen těžko dokázal překonat záhyby na sloupu a unést velké užitečné zatížení. Jako nejlepší možnost pro lezení po sloupech definovaných v zadání práce se jeví zařízení 3D CLIMBER. Toto zařízení používá lokomoční metodu krok za krokem. Dokáže tak překonat překážky na sloupu jako jsou zahnutí, změny průměru, připevněné dopravní značky a jiné překážky. 3D CLIMBER se nedokáže díky geometrii uchopovacího mechanismu přichytit na sloupy s průměrem menším než 200 mm. Většina uvažovaných sloupů má však menší průměry, především u vrcholu.

Rychlost stoupání robotu 3D CLIMBER je poměrně nízká, proto jsem se rozhodl použít odzkoušené principy a pouze změnit konstrukci tak, aby byla schopná zajistit vyšší rychlost.



## **4 KONCEPČNÍ NÁVRH KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ ŠPLHAJÍCÍHO PO SLOUPECH**

Hlavním zadáním práce je vytvořit koncepční návrh zařízení šplhajícího po sloupech, které bude napájeno pomocí externího kabelu. Zařízení by nemělo mít problém s užitečným zatížením v řádu kilogramů.

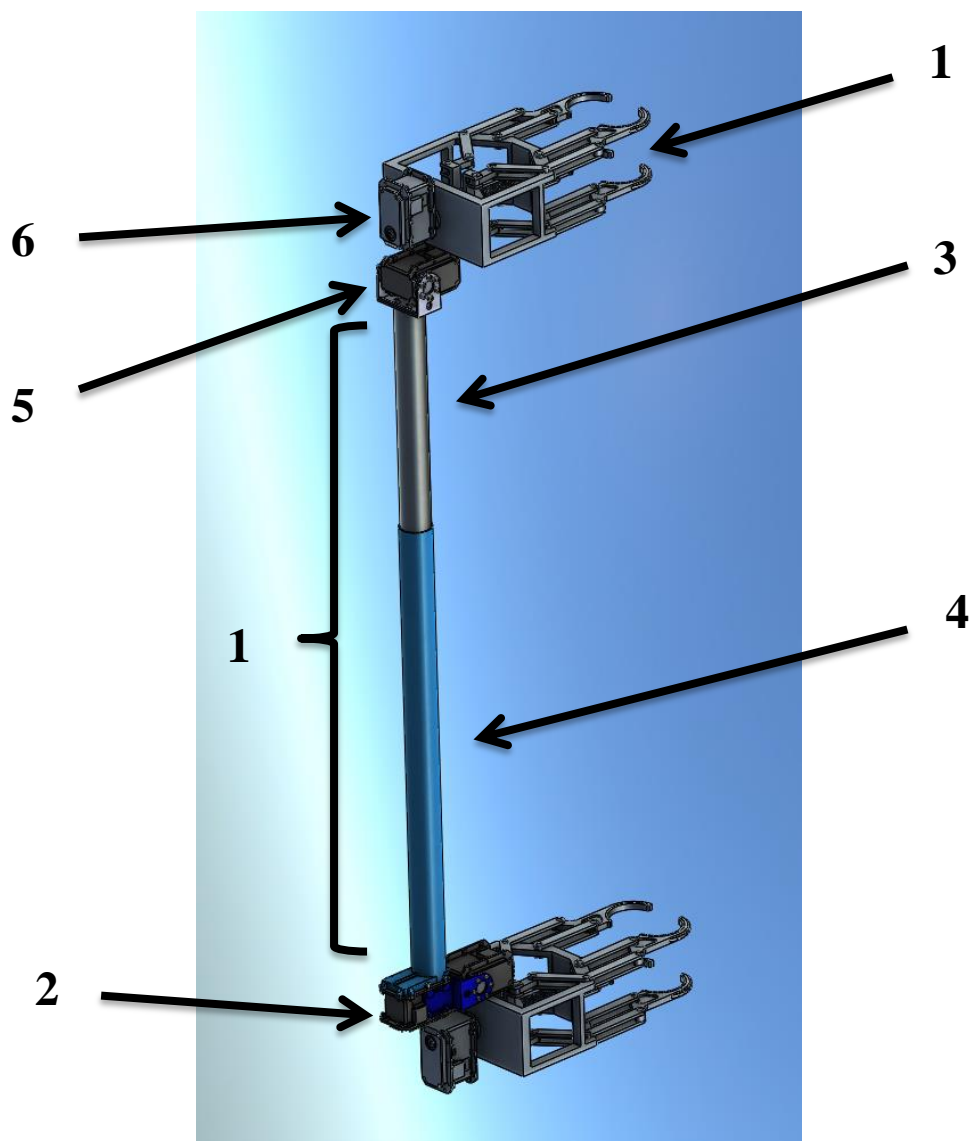
Pro návrh konstrukce byla vybrána metoda lokomoce krok za krokem. Tato metoda má výhody především z hlediska překonávání překážek. Dokáže si poradit se skokovými změnami průřezu, se zahnutím nebo zalomením a s některými překážkami, které zakrývají celý obvod sloupu. Touto metodou je systém schopný vyšplhat i na sloupy, které mohou být pro mnoho jiných šplhajících systémů nedostupné.

Navrhnuté zařízení šplhající po sloupech se skládá z několika hlavních částí viz Obrázek 5. První z nich je hlavní motor, který pohání lineární pohon pohybovým šroubem. Na spodní i horní části přechází lineární pohon v jednoosé klouby, jimiž je zajištěno odklánění nebo naopak příklánění systému vůči sloupu. Celý systém je potom držen na sloupu pomocí dvou uchopovacích mechanismů.

Pro výpočty budeme vycházet z návrhové hmotnosti 5 kg. Jako návrhová hmotnost je uvažována celková hmotnost robota i s užitečným zatížením.

Hlavní požadavky

- požadovaný rozsah upnutí 40 -150 mm



Obrázek 5: Přibližný vzhled navrhovaného zařízení šplhajícího po sloupech; popis obrázku (1 – lineární pohon, 2 – hlavní motor, 3 – vrchní teleskopická tyč, 4 – spodní teleskopická tyč, 5 – naklápěcí motor, 6 – motor uchopovacího mechanismu)

## 4.1 Volba členů lineárního pohonu

Lineárních pohonů je na trhu celá řada. Pro šplhající systém je zvolen elektromechanický lineární pohon sestavený namíru. Výhodou je snadné upravení jednotlivých součástí při změně některých parametrů konstrukce během návrhu.

Hlavními požadavky pro kinematiku lineárního pohonu bude:

- požadovaná rychlost zdvihu  $0,06 \text{ m/s}$
- předpokládaný zdvih  $400 \text{ mm}$

Pro tyto parametry je lineární pohon teoreticky schopný překonat 0,4 m za necelých 7 s. Volba těchto parametrů je určena především dle teoretického uvážení celkových časů při šplhání systému na reálných sloupech.

### 4.1.1 Pohybový šroub

Pohybový šroub je základním stavebním kamenem pro celý elektromechanický lineární pohon.

Volbu pohybového šroubu a matice budu provádět ze stránek výrobce Haberkorn. Výběrem vhodných parametrů šroubu a matice se zajistí optimální poměr rychlosti, mechanické účinnosti, dlouhé životnosti a ceny. Pohybové šrouby se standardně nabízejí kuličkové a trapézové. Kuličkový pohybový šroub má oproti běžnému trapézovému lepší mechanickou účinnost, ale nevýhodou je vyšší cena a nesplňuje podmínku samosvornosti. Z toho důvodu zvolím pohybový šroub s trapézovým závitem. Materiál pohybového šroubu s ohledem na cenu a nízkou hodnotu tření zvolím pro šroub cementační ocel *Ck15* a pro matici bronz *Rg7*. Dalším důležitým parametrem je průměr šroubu, který je volen na základě maximálního normálového napětí  $\sigma_{n,max}$  ve šroubu podle vztahu (4.1), který použijeme s předpokladem, že smyková napětí jsou mnohem menší než normálová.

$$\sigma_{n,max} = \frac{N_C}{S} = \frac{F_G + F_D}{\frac{\pi d^2}{4}} \quad (4.1)$$

$N_C$	maximální normálová síla působící na pohybový šroub
$S$	jmenovitý průřez pohybového šroubu
$\sigma_{n,max}$	maximální normálové napětí
$F_G$	gravitační síla
$F_D$	dynamická síla
$d_{min}$	minimální průměr pohybového šroubu

Samotná volba navrhovaného průměru  $d_{min}$  pohybového šroubu potom vychází z rovnice (4.2) pro návrhový součinitel bezpečnosti  $k_n = 3$  a maximální zrychlení  $a_{max} = 0,6 \text{ m/s}^2$ .

$$d_{min} = \sqrt[2]{\frac{4(F_G + F_D)}{\pi \sigma_{n,max}}} = \sqrt[2]{\frac{4(F_G + m_n a_d)}{\pi \frac{R_e}{k_n}}} \quad (4.2)$$

$$d_{min} = \sqrt[2]{\frac{4 \cdot (50 + 30)}{\pi \cdot \frac{320}{3}}} \cong 1 \text{ mm}$$

$N_C$	maximální normálová síla působící na pohybový šroub
$m_n$	návrhová hmotnost
$a_d$	maximální dynamické zrychlení
$k_n$	návrhový součinitel bezpečnosti
$R_e$	mez kluzu oceli
$S$	jmenovitý průřez pohybového šroubu
$\sigma_{n,max}$	maximální normálové napětí
$F_G$	gravitační síla
$F_D$	dynamická síla
$d_{min}$	minimální průměr pohybového šroubu

Minimální průměr pohybového šroubu  $d_{min}$  vyšel podle rovnice (4.2) po zaokrouhlení přibližně 1 mm. Hodnota je ovšem pouze orientační, protože jsme zanedbali vliv smykových napětí. Vyberu šroub s nejbližším vyšším průměrem Tr 10x2 z katalogu výrobce. Z označení šroubu se určí stoupání  $P = 2$  mm.

Podle stoupání závitu a použitých materiálů zkontrolujeme, jestli je splněna podmínka samosvornosti (4.3). Pro podmínku samosvornosti potřebujeme znát úhel stoupání  $\lambda$ , který určíme na základě goniometrických funkcí ze stoupání závitu. Součinitel tření  $\mu \in (0,1; 0,15)$  pro použitou kombinaci ocelového šroubu a bronzové matice, které jsou mazány. Dosazuje se menší hodnota, aby bylo jisté, že se dosáhne samosvornosti za různých podmínek. [5]

$$\begin{aligned} \mu &> \operatorname{tg} \lambda \cdot \cos \alpha \\ 0,1 &> 0,06 \end{aligned} \tag{4.3}$$

$\mu$	součinitel tření
$\lambda$	úhel stoupání
$\alpha$	vrcholový úhel

Podmínka samosvornosti je splněna, což znamená, že nedojde k samovolnému posunu lineárního pohonu a nemusí tak být použitý elektromotor s brzdou.

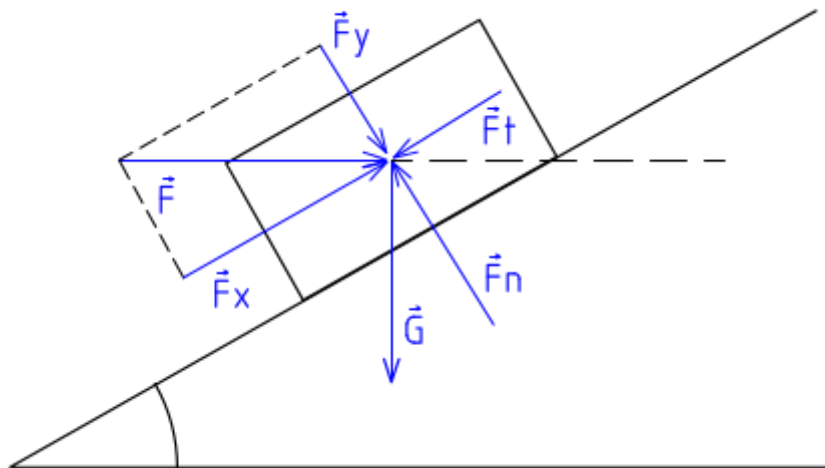
## 4.1.2 Hlavní motor

Hlavní motor musí zajišťovat rotaci pohybového šroubu a s ní spojený translační pohyb šplhajícího systému ve směru rovnoběžném s osou sloupu. Z toho důvodu musí splňovat potřebné jmenovité charakteristiky. Jednou z nejdůležitějších charakteristik jsou jmenovité otáčky motoru. Na základě stoupání pohybového šroubu, které bylo definováno v předcházející kapitole a požadovaná rychlost zdvihu, která je definovaná v hlavních požadavcích na kinematiku, určíme požadované jmenovité otáčky hlavního motoru podle rovnice (4.4).

$$n_{n,p} = \frac{v_z}{P} = \frac{0,06 \cdot 60}{2 \cdot 10^{-3}} = 1800 \text{ ot/min} \quad (4.4)$$

$n_{n,p}$  požadované jmenovité otáčky  
 $v_z$  požadovaná rychlost zdvihu  
 $P$  stoupání pohybového šroubu

Požadované jmenovité otáčky vycházejí podle (4.4)  $n_{n,p} = 1800 \text{ ot/min}$ . Hlavní motor tedy budeme volit s otáčkami co nejbližšími k otáčkám požadovaným. Samotná volba motoru je možná až poté co určíme zvedací moment a potřebný výkon. Zvedací moment potřebný k uvedení zatíženého pohybového šroubu do pohybu je stejný jako třecí moment, jen má opačný směr. Obrázek 6 schématicky zobrazuje silové poměry trapézového pohybového šroubu. Jak je vidět, silové poměry je možné převést na nakloněnou rovinu a tím značně zjednodušit.



Obrázek 6: Schématické znázornění silových poměrů trapézového závitu

Podle rovnice (4.5) se vypočítá zvedací moment.

$$M_{ZV} = F_{ZV} \frac{d}{2} \quad (4.5)$$

$M_{ZV}$  zvedací moment  
 $F_{ZV}$  zvedací síla  
 $d$  střední průměr pohybového šroubu

Dosazením za  $F_{ZV}$  dostaneme vztah (4.6), podle kterého po dosazení vypočítáme zvedací moment. [5]

$$M_{ZV} = \frac{F_G \cdot (P \cos \alpha + \pi \mu d)}{\pi d \cos \alpha - \mu P} \cdot \frac{d}{2} \quad (4.6)$$

$$M_{ZV} = \frac{80 \cdot (2 \cdot \cos 15 + \pi \cdot 0,15 \cdot 8,7)}{\pi \cdot 8,7 \cdot \cos 15 - 0,15 \cdot 2} \cdot \frac{8,7}{2} \cong 0,1 \text{ Nm}$$

$F_G$  gravitační síla  
 $\mu$  součinitel tření  
 $P$  stoupání závitu  
 $M_{ZV}$  zvedací moment  
 $d$  střední průměr pohybového šroubu  
 $\alpha$  vrcholový úhel

Ze vzorce (4.7) určíme účinnost pohybového šroubu. [5]

$$\eta_s = \frac{\cos \alpha - \mu \tan \lambda}{\cos \alpha + \mu \cot \lambda} \quad (4.7)$$

$$\eta_s = \frac{\cos 15 - 0,15 \cdot \tan 3,66}{\cos 15 + 0,15 \cdot \cot 3,66} \cong 0,29$$

$$\eta_s = 29 \%$$

$\alpha$  vrcholový úhel  
 $\eta_s$  účinnost pohybového šroubu  
 $\alpha$  vrcholový úhel  
 $\lambda$  úhel stoupání

Výsledný zvedací moment dosadíme z rovnice (4.6) do vztahu (4.8).

$$P_p = M_{ZV}\omega = M_{ZV}2\pi n \quad (4.8)$$

$$P_p = 0,1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{1800}{60} \cong 19 \text{ W}$$

$P_p$	potřebný výkon
$M_{ZV}$	zvedací moment
$\omega$	úhlová rychlost
$n$	předpokládané otáčky

Žádný motor nepracuje se stoprocentní účinností. Proto musíme při volbě vhodného motoru počítat i se ztrátami výkonu v motou. Tyto ztráty činí přibližně dvacet procent z celkového příkonu motoru. Při dimenzování motoru je vhodné uvažovat jeho provozní zatížení přibližně při třech čtvrtinách jeho maximálního výkonu. Zajistí se tím lepší účinnost než při plném zatížení a motor získá větší životnost. V rovnici (4.9) určíme optimální potřebný výkon elektromotoru při otáčkách 1800 ot/min.

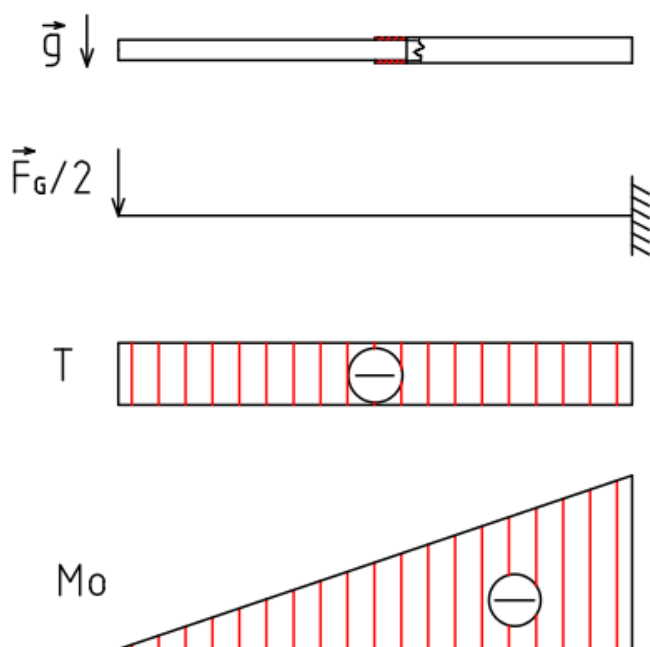
$$P_{opt} = \frac{P_p}{\eta_e c} = \frac{19}{0,8 \cdot 0,75} \cong 32 \text{ W} \quad (4.9)$$

$P_{opt}$	optimální potřebný příkon motoru
$P_p$	potřebný výkon
$c$	konstanta zatížení motoru
$\eta_e$	účinnost motoru

Pro zajištění požadované rychlosti zdvihu zvolím motor, který bude mít výstupní jmenovité otáčky co nejbližší požadovaným otáčkám, které vycházejí z rovnice (4.4). Příkon motru zvolíme co nejbližší vyšší optimálnímu příkonu motoru, z důvodu kompenzace ostatních ztrát ve zbytku systému, které jsou ovšem zanedbatelné oproti ztrátám v motoru a šroubu.

### 4.1.3 Teleskopická tyč

Teleskopická tyč navrhovaného zařízení spojuje vrchní a spodní část systému. Uprostřed spodní teleskopické tyče je umístěn pohybový šroub, který je poháněn hlavním elektromotorem. Vrchní tyč je pevně spojena s maticí pohybového šroubu a díky tomu je zajištěn lineární zdvih vrchní tyče. Matice má po obvodu 2 vodící drážky, které zamezují protáčení matice při zdvihu. Průřez teleskopických tyčí je volen kruhový, protože je levný na výrobu a má malou třecí plochu. Celá teleskopická tyč musí přenášet ohybové síly vznikající při pohybu zařízení po sloupech. Nejhorší možná poloha šplhajícího zařízení je ve vodorovném stavu při maximálním možném výsuvu zdvihu. Právě pro tuto polohu je potřeba dimenzovat průřezy.



**Obrázek 7: Přibližné průběhy VVÚ v teleskopické tyči**

Výpočet minimálního průřezu provedeme po zjednodušení případu. Teleskopická tyč je zatížena gravitační silou, která působí v težišti zařízení. Za předpokladu splnění prutových předpokladů můžeme celý mechanismus považovat za jediný prut. Následně Obrázek 7 zobrazuje zjednodušený průběh výsledných vnitřních účinků, kde poloviční gravitační síla na volném konci prutu způsobuje ohybový moment o stejné velikosti, jako kdyby gravitační síla působila uprostřed prutu. Zabývat se budeme nebezpečným místem, které je na pravém konci. Ze vzorce (4.10) dosazením a vyjádřením určíme průměry.



$$\sigma_o = \frac{\frac{F_G}{2} l}{\frac{\pi(D^3 - d^3)}{32}} = \frac{R_e}{k_n} \quad (4.10)$$

$$d = \sqrt[3]{-\frac{32 \cdot l F_G k_n}{2 \cdot R_e \pi} + D^3}$$

$$d = \sqrt[3]{-\frac{32 \cdot 1000 \cdot 80 \cdot 3}{2 \cdot 320 \cdot \pi} + 32^3} \cong 30,74 \text{ mm}$$

$\sigma_o$	ohybové napětí
$F_G$	gravitační síla
$l$	délka vysunutých teleskopických tyčí
$D$	větší průměr
$d$	menší průměr
$R_e$	mez kluzu materiálu
$k_n$	návrhový součinitel bezpečnosti

Pro zvolené hodnoty, které jsou dosazeny do vztahu (4.10) vychází menší průměr teleskopické tyče přibližně  $d = 30,7 \text{ mm}$ . Výpočet je provedený pro ocelový materiál a vypočtená hodnota je pro bezpečnost  $k_n = 3$ . Kvůli poměrně dlouhé délce zařízení, ještě zkontrolujeme, jaká bude maximální deformace podle rovnice (4.11) pro zvolené hodnoty malého a celkého průměru průřezu  $D = 32 \text{ mm}$  a  $d = 30 \text{ mm}$

$$u_{max} = \frac{\partial W}{\partial F_G} \quad (4.11)$$

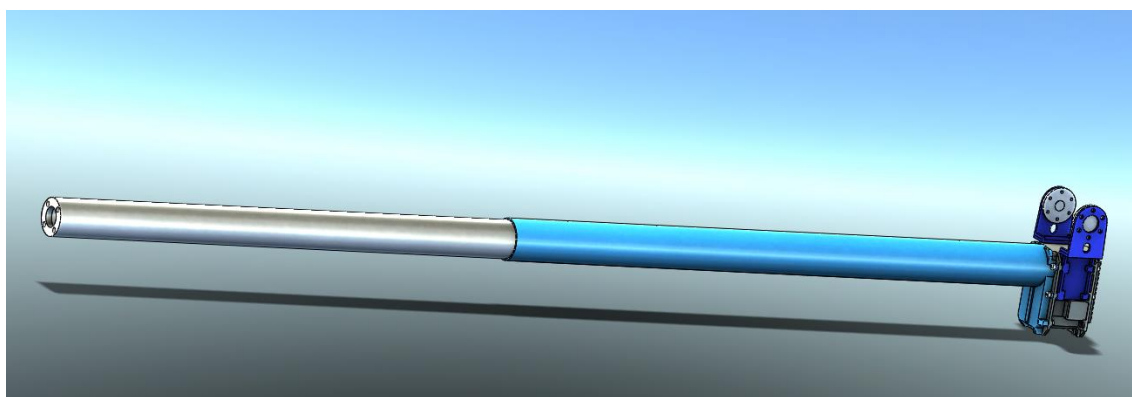
$u_{max}$	maximální průhyb
$W$	energie napjatosti
$F_G$	poloviční gravitační síla působící na volném konci prutu

Po zjednodušení a zintegrování vztahu (4.11) získáme vztah (4.12)

$$u_{max} = \frac{F_G l^3}{3EJ_y} = \frac{40 \cdot 1000^3 \cdot 64}{3 \cdot 210000 \cdot \pi \cdot (32^4 - 30^4)} \cong 6 \text{ mm} \quad (4.12)$$

$u_{max}$	maximální průhyb
$l$	délka zařízení
$F_G$	poloviční gravitační síla působící na volném konci prutu
$E$	modul pružnosti oceli v tahu
$J_y$	kvadratický moment průřezu

Maximální průhyb na volném konci zařízení vyšel přibližně  $u_{\max} = 6 \text{ mm}$ , což je vzhledem k celkovým rozměrům přijatelná hodnota. Výsledek však musíme brát pouze jako orientační, protože jsme při výpočtu provedli řadu zjednodušení. Výsuvná tyč bude volena z nerezové oceli z důvodu korozivzdornosti a dobré odolnosti proti poškrábání. Obrázek 8 zobrazuje teleskopickou tyč při maximálním výsuvu.



**Obrázek 8: Teleskopická tyč ve vysunutém stavu**

## 4.2 Kloub naklápění

Naklápěcí systém umožňuje šplhajícímu zařízení celkové odklánění nebo naopak přiklánění. Tento pohyb je pro zařízení důležitý k překonávání ohybů na sloupu, při změnách průřezu nebo při upravování polohy uchopovacích mechanismů při lezení. Obrázek 9 zobrazuje zvolené řešení. Při návrhu byl kladen důraz na jednoduchost, proto je celý kloub nahrazen motorem s integrovanou převodovkou. Odpadá tak nutnost použití kloubu, ve kterém by se zvyšovaly mechanické ztráty, a narůstala by celková hmotnost.



**Obrázek 9: Možné řešení kloubu naklápění**

Největší ohybový moment působí na kloub naklápění při vodorovné poloze teleskopické tyče. Z toho důvodu určíme maximální moment, který musí být motor schopný překonat právě v této poloze. Minimální záběrný moment motoru určíme ze vztahu (4.13).

$$M_Z = F_G \frac{l}{2} \quad (4.13)$$

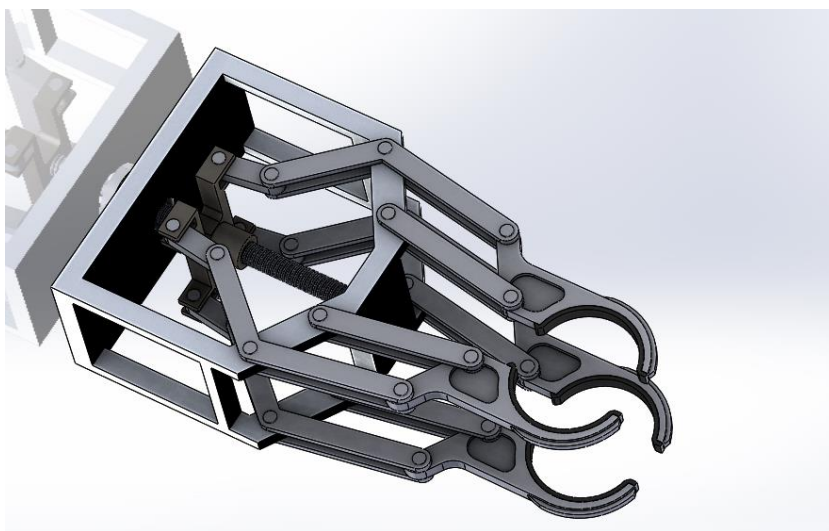
$$M_Z = 80 \cdot \frac{1}{2} = 16 \text{ Nm}$$

MZ	záběrný moment
FG	gravitační síla
l	délka zařízení

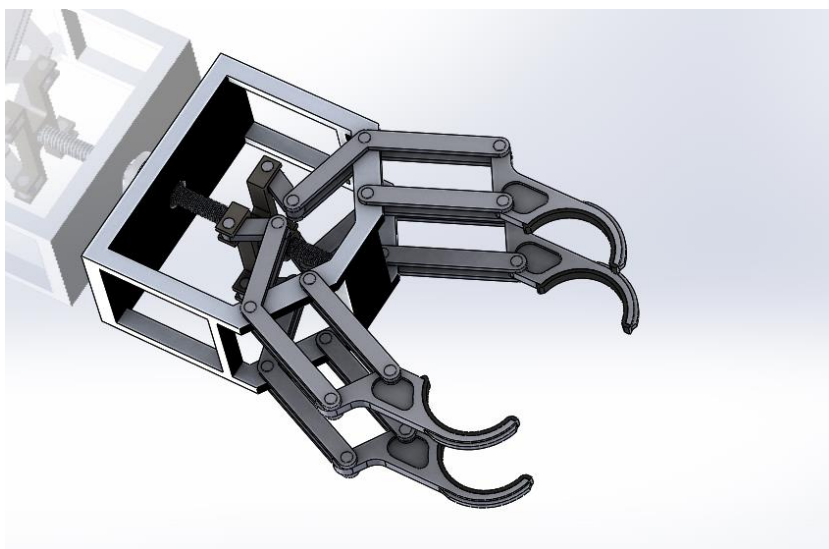
Moment spočítaný podle vztahu (4.13) uvažuje pouze statický stav, proto zvolený motor musí být volený s dostatečným předimenzováním minimálního záběrného momentu alespoň o 20%, aby byl schopný uvést zařízení z vodorovného stavu do pohybu.

### 4.3 Uchopovací mechanismus

Uchopovací mechanismus je potřebný k uchycení celého šplhajícího robota na sloup. Obrázek 10 a Obrázek 11 zobrazuje otevírání a zavírání čelistí uchopovacího mechanismu.



Obrázek 10: Uchopovací mechanismus se zavřenými čelistmi



Obrázek 11: Uchopovací mechanismus s otevřenými čelistmi

Rozsah průměru sloupu byl volen podle reálných sloupů. Požadovaný rozsah, při kterém má být uchopovací systém schopný se přichytit byl tedy zvolen 40 – 150 mm. Na koncích ramen jsou gumové podložky, aby nedošlo k poškrábání sloupu. Kinematika byla volena tak, aby při zavírání čelistí nedocházelo k rotačnímu pohybu čelistí, protože by hrozilo při zvětšujícím se průměru vyklouznutí ze sloupu. Dvojitě čelisti byly zvoleny z důvodu lepšího přenášení ohybového momentu. Pro pohyb čelistí byl zvolen pohon pohybovým šroubem, který bude samosvorný.

## 4.4 Ostatní prvky

Ostatními prvky zařízení se myslí spojovací součásti mezi jednotlivými motory a hlavními součástmi. Tyto jsou navrženy v modelu jen přibližně, především aby zajišťovaly kinematické vazby mezi jednotlivými hlavními funkčními prvky celého systému. Jako materiál je volena slitina hliníku, která má dobrý poměr pevnosti a hmotnosti.

## 4.5 Souhrn

Celý návrh zařízení byl vymodelován v programu SolidWorks. Model je určen pro bližší pochopení funkce systému. Zároveň nám dává reálnější představu o rozměrech celého systému. Model obsahuje řadu součástí, které jsou zjednodušeny, avšak dává nám alespoň přibližnou představu o hmotnosti systému, která se bude pohybovat v rozmezí 6 – 7 kg v závislosti na konkrétních použitých motorech. Celý robot byl dimenzován na 5 kg i s užitečným zatížením při použití návrhového součinitele  $k_n=3$ . Bylo by vhodné použití kvalitnějších lehčích materiálů a odlehčit místa s nízkým namáháním. Dalším způsobem snížení hmotnosti a celkového namáhání konstrukce by bylo snížení zdvihu lineárního pohonu zařízení a tím zmenšení celkových rozměrů. Toto řešení by bylo nejjednodušší, avšak by vedlo ke značnému snížení rychlosti šplhání.

# ZÁVĚR

Začátek práce obsahuje základní rozdělení robotických systémů. Dále popisuje několik typů zařízení používaných pro lokomoci po sloupech. Jedná se o šplhající systémy 3D CLIMBER, RiSE V3 a UT-PCR.

Hlavním cílem práce bylo vytvořit koncepční návrh zařízení šplhajícího po sloupech, které mělo být napájeno pomocí externího kabelu. Další podmínkou bylo, že zařízení by nemělo mít problém s užitečným zatížením v řádu kilogramů. Největší vzor pro řešení návrhu jsem získal ze systému 3D CLIMBER, který používá lokomoční metodu krok za krokem. Tato metoda byla zvolena i pro navrhovaný systém.

Navrhnutý robot je teoreticky schopný překonávat překážky, poradit si se skokovými změnami průřezu, se zahnutím nebo zalomením a s některými překážkami, které zakrývají celý obvod sloupu. Touto metodou je systém schopný vyšplhat i na sloupy, které mohou být pro mnoho jiných šplhajících systémů nedostupné.

Hlavní částí zařízení je lineární pohon, který se skládá z teleskopické tyče, pohybového šroubu a hlavního motoru. Na spodní i horní části přechází lineární pohon v jednoosé klouby, jimiž je zajištěno odklánění nebo naopak přiklánění systému vůči sloupu. Systém obsahuje dva uchopovací mechanismy, které drží celé zařízení na sloupu.

Koncepční návrh zařízení by se dal po dalších úpravách použít v praxi. Důležité by bylo snížení hmotnosti a celkového namáhání konstrukce. Toho se dá dosáhnout snížením zdvihu lineárního pohonu zařízení, čímž by došlo ke zmenšení celkových rozměrů. Toto řešení by bylo nejjednodušší, avšak vedlo by ke značnému snížení rychlosti šplhání. Další úpravou by bylo použití kvalitnějších materiálů z důvodu zvýšení součinitele bezpečnosti, protože se zařízení pohybuje nad lidmi a při jeho selhání by mohlo dojít k úrazu.

# LITERATURA

- [1] KÁRNÍK, Ladislav. *Praktické aplikace servisních robotů: studijní opora* [online]. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011, 1 DVD-ROM [cit. 2015-05-02]. ISBN 978-80-248-2727-8. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2727-8.pdf>
- [2] TAVAKOLI, Mahmoud, Lino MARQUES a Aníbal T. de ALMEIDA. *3DCLIMBER: Climbing and manipulation over 3D structures* [online]. [cit. 2015-05-28]. 10.1016/j.mechatronics.2010.08.006. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095741581000142X>
- [3] HAYNES, G.C., A. KHRIPIN, G. LYNCH, J. AMORY, A. SAUNDERS, A.A. RIZZI, D.E. KODITSCHKE, Hidekazu SUZUKI, Hitoshi NISHI, et al. *Rapid pole climbing with a quadrupedal robot: A Dynamic Quadrupedal Robot for Locomotion on Vertical and Horizontal Surfaces* [online]. 2009 [cit. 2015-05-28]. ISBN 10.1007/1-84628-307-8\_10. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/icp.jsp?arnumber=5152830>
- [4] SOCIETY], [sponsored by the IEEE Robotics and Automation. *IEEE International Conference on Robotics and Automation [robots get closer to humans: ICRA '05 : 18-22 April 2005, Barcelona, Spain]* [online]. Piscataway, N.J.: IEEE, 2005 [cit. 2015-05-28]. ISBN 07-803-8914-X. ISSN 0-7803-8914-X. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/icp.jsp?arnumber=1570423>
- [5] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. Brno: VUTUM, 2010, 1159 s. Series in mechanical engineering (McGraw-Hill). ISBN 978-80-214-2629-0.